

超临界机组的机理模型

1 数学模型

机组模型可以写成状态空间的形式，为：

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B(X)U \\ Y = C(X) + D(X)U \end{cases}$$

式中：

请注明这些参数和变量的物理含义及单位

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [r_b \quad p_m \quad h_m]^T, U = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T = [u_b \quad D_{fw} \quad u_t]^T, Y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3]^T = [P_{st} \quad h_m \quad N_e]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{c_0} & 0 & 0 \\ \frac{k_0}{c_1} & 0 & 0 \\ \frac{k_0}{c_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B(X) = \begin{bmatrix} \frac{e^{-\tau s}}{c_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h_{fw} - d_1}{c_1} & \frac{f[x_2 - g(x_2)]\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\}(d_1 - lx_3)}{c_1(lx_3 - h_{fw})} \\ 0 & \frac{h_{fw} - d_2}{c_2} & \frac{f[x_2 - g(x_2)]\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\}(d_2 - lx_3)}{c_2(lx_3 - h_{fw})} \end{bmatrix},$$

$$C(X) = \begin{bmatrix} x_2 - g(x_2) \\ x_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 f[x_2 - g(x_2)]\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\} \end{bmatrix}$$

2 参数辨识

根据模型，需要辨识的有 4 个稳态参数， l 、 k_0 、 k_1 、 h_{fw} ，6 个动态参数， c_0 、 c_1 、 c_2 ， d_1 、 d_2 和 τ ，以及三个待定函数， $f(\cdot)$ ， $g(\cdot)$ ， $h(\cdot)$ 。其中 $h_{fw}=1200 \text{ kJ}$ 。

2.1 静态参数求取

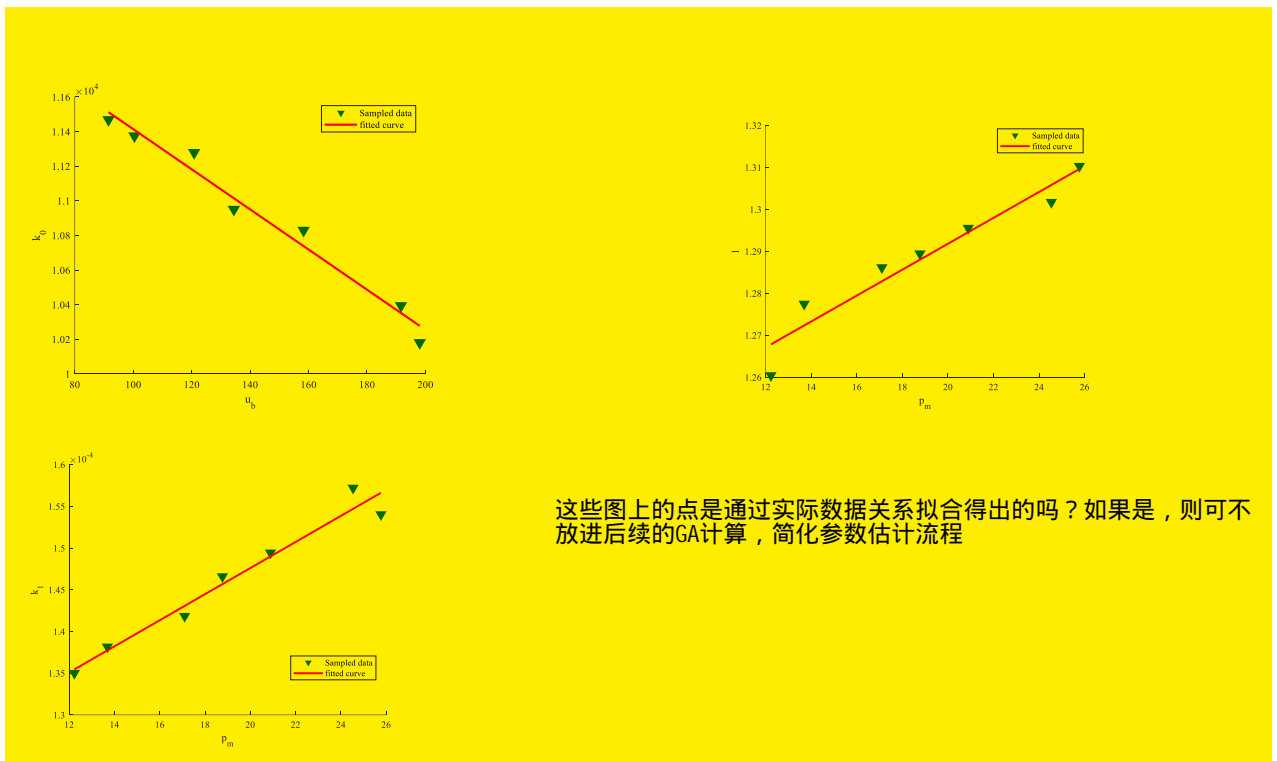
当机组处于稳态时，内部状态认为处于稳定状态对于静态参数，根据上式，有：

请提供稳态（即初始的）输入U、输出Y和状态X

$$\begin{aligned} u_b &= r_b \\ D_{fw} &= D_s \\ D_{fw}h_{fw} - lD_s h_m + k_0 r_b &= 0 \end{aligned}$$

随着负荷的增长， l ， k_1 大致呈现增长的趋势， k_0 呈现降低的趋势。参数 l 代表过热器出口蒸汽比焓与汽水分离器出口比焓，与中间点压力相关；参数 k_0 ，代表入炉煤量和蒸汽吸热量的关系，因此拟合为 u_b 的函数；参数 k_1 ，代表汽轮机的效率，可拟合为中间点压力的函数。下式为各自的拟合函数，

$$\begin{aligned} l &= 0.0024p_m + 1.2478 \\ k_0 &= -13.9851r_b + 12747 \\ k_1 &= 1.25 \times 10^{-6} p_m + 1.28 \times 10^{-4} \end{aligned}$$



2.2 待定函数求取

$g(\cdot)$ 为过热器压差和中间点压力之间的函数， $f(\cdot)$ 为主蒸汽流量与主蒸汽压力之间的函数， $h(\cdot)$ 为主蒸汽压力和主蒸汽焓值之间的函数。

$$g(p_m) = 0.0707p_m - 0.0164$$

$$f(p_{st}) = 48.001p_{st} - 13.11$$

$$h(p_{st}) = -11.116p_{st} + 3616.5$$

2.3 动态参数求取

采用遗传算法辨识动态参数，其适应度函数设置为：[单目标寻优的形式所得结果较“死”，可以换多目标寻优，如NSGA-II](#)

$$f(x) = \sum_{t=1}^{t_f} \left| \frac{\Delta p_{st}}{p_{st0}} \right| + \left| \frac{\Delta Ne}{Ne_0} \right| + \left| \frac{\Delta h_m}{h_{m0}} \right| + \left| \frac{\Delta r_b}{r_{b0}} \right|$$

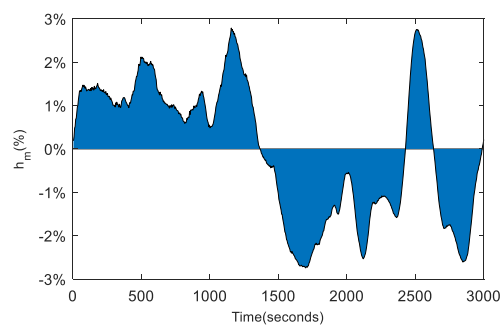
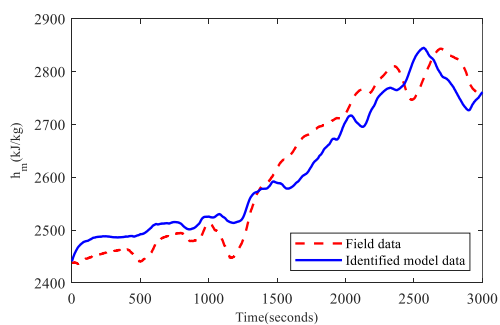
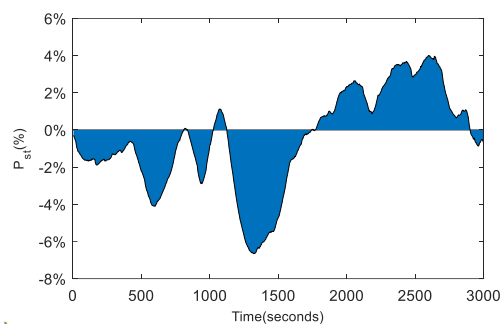
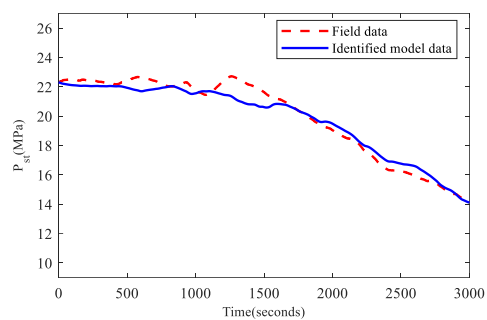
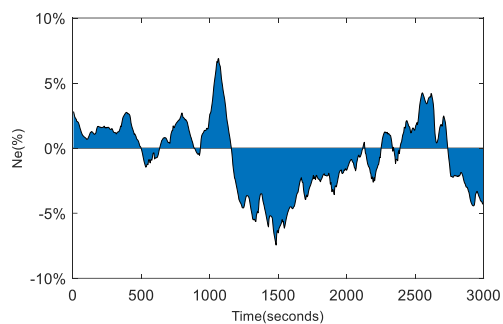
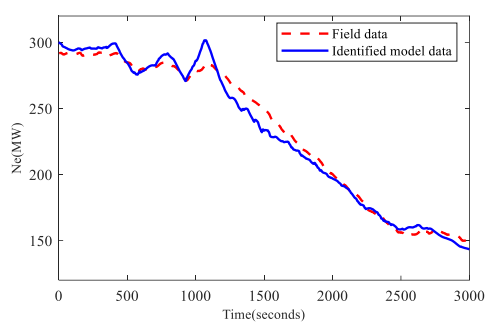
辨识得到的参数： $h_{fw} = 1200\text{kJ/kg}$ ， $c_0=1.128$ ， $\tau=0.3$ ， $c_1=2490800$ ， $c_2=36757$ ， $d_1=283.1$ ， $d_2=2498$

3.验证结果

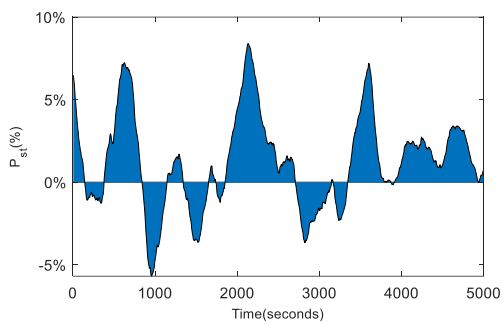
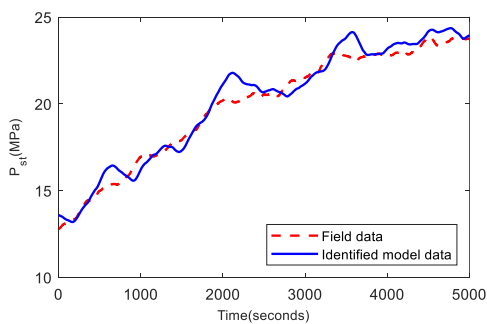
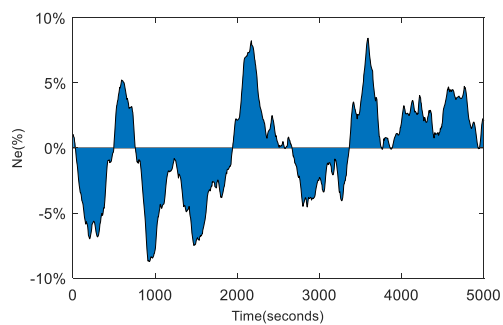
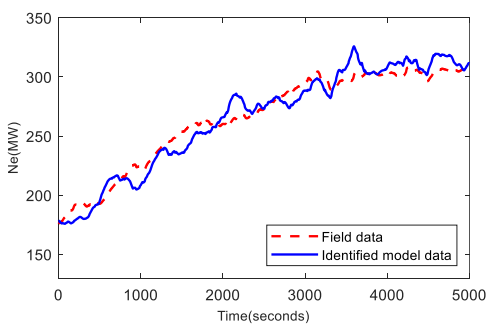
3.1 辨识数据对比

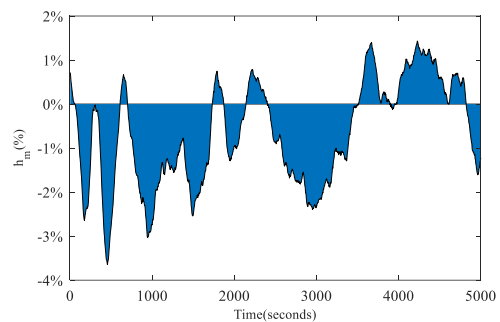
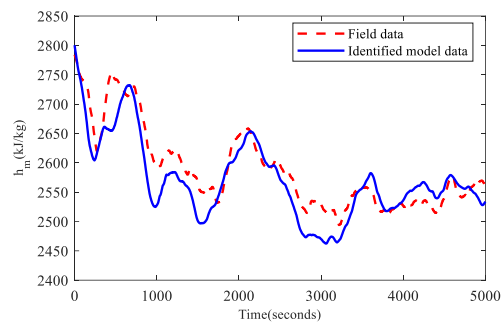
[请提供验证数据](#)

选取实际 3000s 的数据段用于计算动态参数，以得到完整的非线性机理模型。同时选取另外两段数据用于测试模型的准确性和可靠性，对比和验证的结果如下图所示。非线性机理模型能够很好地和现场数据吻合，输出功率、主汽压力和中间点焓的平均相对误差不超过 4%。未参与辨识的数据也表现出很好的结果，三组输出的变化趋势和实际数据保持一致。



3.2 测试数据对比





数据	输出功率的相对误差		主蒸汽压力的相对误差		中间点焓的相对误差	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
辨识数据	2.40%	7.45%	2.20%	6.66%	1.59%	5.05%
测试数据	3.19%	8.73%	2.43%	8.40%	1.11%	3.64%